

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Talotekniikan koulutusohjelma

Mari Kauppinen

PAINE-EROMITTAUKSET RAKENNUSVAIPAN YLI

Opinnäytetyö  
Helmikuu 2021



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Helmikuu 2021**  
**Talotekniikan koulutusohjelma**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä(t)  
Mari Kauppinen

Nimeke  
Paine-eromittaukset rakennusvaipan yli

Toimeksiantaja  
Granlund Joensuu

**Tiivistelmä**

Paine-eromittauksia rakennusvaipan yli tehdään nykyisin uusissa ja vanhoissa kohteissa paljon. Mittauksia tehdään sekä lyhyellä aikavälillä että jatkuvana mittauksena. Mittauksilla halutaan selvittää, onko rakennus tai sen osa tasapainossa vai yli- tai alipaineinen. Mittaustulosten perusteella voidaan ymmärtää ilmavirtojen liikkumista ja tätä kautta pystytään arvioimaan ilmavirtojen mukana siirtyvien kosteuden ja epäpuhtauksien vaikutusta rakenteisiin ja sisäilmaan. Mittauksien toteuttamiseen ja tulkintaan liittyy kuitenkin haasteita, joita on tässä opinnäytetyössä pyritty avaamaan. Opinnäytetyön toimeksiantajana on Granlund Joensuu Oy.

Rakennusvaipan yli muodostuvaan paine-eroon vaikuttavat tuuli, hormivaikutus ja ilmanvaihto. Näistä eniten pystytään vaikuttamaan ilmanvaihtoon. Tuuli ja hormivaikutus ovat elementtejä, jotka muuttuvat sään mukana, joten kaikkien näiden yhteisvaikutuksen huomioon ottaminen on haastavaa. Opinnäytetyö toteutettiin asentamalla mittauksia saneerattavaan kohteeseen ja tutkimalla näitä mittaustuloksia.

Mittauksista saadut tulokset vastasivat hyvin käsiteltyyn teoriaan. Tärkeää mittauksien suunnittelussa on tutustua kohteeseen ja määrittää mittauspisteiden paikat huolella. Varsinkin ulkoreferenssimittauspisteen sijainnilla on suuri merkitys tuloksiin. Tulosten tulkintaan kannattaa myös panostaa, sillä pelkkien raja-arvojen ylittyminen mittauksissa ei välttämättä anna oikeaa kuvaa tilanteesta.

Kieli  
suomi

Sivuja 43  
Liitteet  
Liitesivumäärä

Asiasanat  
paine-ero, hormivaikutus, alipaine, ylipaine



**THESIS**  
**February 2021**  
**Degree Programme in Building Services**  
**Engineering**  
Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+ 358 13 260 600 (switchboard)

Author (s)  
Mari Kauppinen

Title  
Differential Pressure Measurements

Commissioned by  
Granlund Joensuu

**Abstract**

Differential pressure measurements across the building envelope are now widely used in new and old buildings. Measurements are made both in the short term and as a continuous measurement. The purpose of the measurements is to determine whether the building or part of it is in equilibrium or over or under pressure. Based on the measurement results, it is possible to understand the movements of air and through this it is possible to assess the effect of moisture and pollutants transferred with air flows on structures and indoor air. However, there are challenges in implementing and interpreting the measurements and those issues this thesis has sought to open up. The topic was commissioned by Granlund Joensuu Oy.

The pressure difference across the building envelope is affected by wind, chimney effect and ventilation. Of these, ventilation can be affected the most. Wind and chimney effects are elements that change with the weather, so it is challenging to consider the combined effect of all of these. The thesis was carried out by installing measurements on the school building to be renovated and examining these measurement results.

The results obtained from the measurements corresponded well to the discussed theory. It is important when planning measurements to get to know the building and determine the locations of the measurement points carefully. In particular, the location of the external reference measurement point is of great importance for the results. It is also worth investing in the interpretation of the results, as exceeding the limit values in the measurements alone may not tell the truth.

Language  
Finnish

Pages 43  
Appendices  
Pages of Appendices

Keywords  
differential pressure, chimney effect, under pressure, over pressure

# Sisältö

1	Johdanto .....	5
2	Paine-erojen muodostuminen rakennuksessa .....	5
2.1	Ilmanvaihto.....	6
2.2	Terminen paine-ero.....	7
2.3	Tuuli.....	10
2.4	Rakennuksen tiiveys ja rakenteelliset keinot .....	11
2.5	Paine-eron mittaus.....	12
3	Paine-erojen vaikutus rakennukseen ja sisäilmastoon.....	13
3.1	Suosituksset ja määräykset paine-eroihin .....	13
3.2	Alipaineen vaikutus .....	14
3.3	Ylipaineen vaikutus.....	15
4	Tutkimuskysymykset.....	16
5	Mittaustulokset ja analyysit.....	17
5.1	Tutkimuskohde .....	17
5.2	Mittaustulokset .....	21
5.3	Referenssipisteen korkeuden vaikutus .....	23
5.4	Ilmansuunnan vaikutus mittaustuloksiin.....	28
5.5	Paikan vaikutus tilassa.....	31
5.6	Mittaustulosten tulkinta.....	33
6	Ohjeistus paine-erojen suunnitteluun, mittaamiseen ja seurantaan.....	36
7	Pohdinta.....	39
	Lähteet .....	42

## 1 Johdanto

Paine-erojen mittaamista rakennusvaipan yli käytetään nykyisin yleisesti sekä etsittäessä mahdollisia ongelmia rakennuksissa että uudiskohteissa todennettaessa rakennuksen terveellisyyttä ja turvallisuutta. Mittaamisesta ja mittaustulosten analysoinnista ei kuitenkaan ole pitkän aikavälin tietoa ja taitoa luotettavien tulosten saamiseksi. Tämän takia mittauksista saatavaa tietoa ei aina hyödynnetä riittävästi eivätkä mittaustulokset johda muutoksiin tai korjauksiin rakennuksissa.

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin paine-erojen mittaamisen suunnitteluun liittyviä ongelmakohtia ja mittaustulosten analysointiin liittyviä haasteita. Toimeksiantajana oli Granlund Joensuu, jossa paine-eromittauksia suunnitellaan laajasti erilaisiin kohteisiin. Tutkimuskysymyksiin etsittiin vastauksia asentamalla saneerattavaan kohteeseen sisä- ja ulkopuolisen paine-eromittaukseen liittyviä mittauspisteitä.

## 2 Paine-erojen muodostuminen rakennuksessa

Paine-erot rakennuksessa tarkoittavat sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa tai joidenkin tilojen välistä paine-eroa. Paine-eroa syntyy lämpötilan ja hormivaikutuksen, ilmanvaihdon ja tuuliolosuhteiden vuoksi. Avoimessa tilassa paine-erot pyrkivät tasoittumaan eli korkeammasta paineesta virtaa ilmaa matalampaan paineeseen. (Pitkäranta 2016, 86.)

Koko rakennusvaipan yli muodostuvan paine-eron voi laskea seuraavasti:

$$\Delta P = \Delta P_w + \Delta P_s + \Delta P_v \quad (1)$$

jossa  $\Delta P$  = paine-ero rakennusvaipan yli

$\Delta P_w$  = tuulen vaikutus

$\Delta P_s$  = hormivaikutus

$\Delta P_v$  = ilmanvaihdon vaikutus (Hagentoft 2001, 77).

Seuraavissa luvuissa käydään tarkemmin läpi kunkin osuuden vaikutus paine-eroihin. Rakennuksen tiiveys vaikuttaa siihen, kuinka paljon näillä eri tekijöillä on merkitystä paine-eroihin, joten myös tiiveyttä käsitellään.

## 2.1 Ilmanvaihto

Ilmanvaihdon vaikutus paine-eroihin rakennusvaipan yli riippuu ilmanvaihtojärjestelmästä ja siitä, kuinka järjestelmä ja ilmavirrat ovat säädetty. Yleensä paine-eroa rakennusvaipan yli ei oteta huomioon suunniteltaessa ilmanvaihtojärjestelmää. (Järnström, Koivusaari & Saari 2017, 39.)

Painovoimaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä ilma liikkuu lämpötilaerojen ja tuulen aiheuttaman paine-eron mukaan. Painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä ei siis itsessään luo paine-eroja sisä- ja ulkotilojen välille. Paine-erot vaihtelevat tässä järjestelmässä sääolosuhteiden mukaan; talvella lämpötilaerojen ollessa suuri sisä- ja ulkotilan välillä, myös paine-eroa syntyy. Samoin tuulisena päivänä paine-ero on havaittavissa. (Siikanen 2014, 205.)

Koneellisessa poistossa ilmaa poistetaan puhaltimen avulla ja korvausilma tulee suoraan ulkoa. Toimiakseen koneellinen poistoilmanvaihto vaatii alipaineen, vähintään 10 Pa, joten järjestelmä onkin ilmanvaihtojärjestelmistä usein suurin paine-erojen aiheuttaja. Korvausilmareitit ovat harvoin järjestetty asianmukaisella tavalla ja sen seurauksena ulkoilmavirtaa virtaa sisätiloihin hallitsemattomasti esimerkiksi erilaisten aukkojen ja epätiiveyskohtien kautta. (Siikanen 2014, 205; Hagentoft 2001, 77; Saari, Nyman, Koivusaari & Järnström, 4.)

Myös erillispoistot sekä käyttöajan ulkopuolella olevat poistot ovat usein suuren paine-eron aiheuttajia. Erillispoistot voivat aiheuttaa suuren alipaineisuuden rakennukseen, jos korvausilman saannista ei ole huolehdittu. Tarpeen mukaan käytössä olevat erillispoistot ovat haasteellisia hallita paine-erojen suhteen. Käyttöajan ulkopuolella olevat poistot luovat myös rakennukseen alipaineisuuden. (Saari ym., 5,7.)

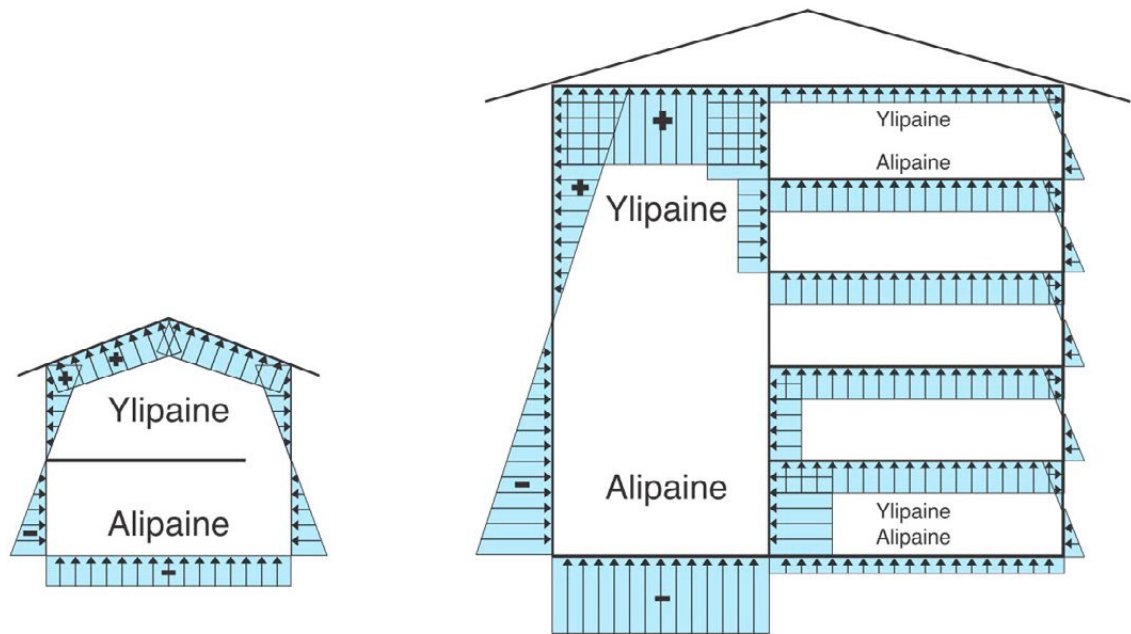
Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihdossa sekä tulo- että poistoilma johdetaan tiloihin koneellisesti puhaltimien avulla. Tuloilma tuodaan yleensä puhtaisiin tiloihin, kuten makuuhuoneisiin ja poistoilma johdetaan pois likaisista tiloista eli esimerkiksi vessoista. Näin ilma siirtyy puhtaammista tiloista likaisimpiin tiloihin. Paine-eroja pyritään siis luomaan tarkoituksella huonetilojen välillä, jotta ilma liikkuu oikeaan suuntaan. (Seppänen & Seppänen 1996, 171-173.)

Järjestelmä on perinteisesti mitoitettu alipaineiseksi. Uudisrakennukset ovat kuitenkin hyvin tiiviitä, joten jos ilmanvaihtoa suunniteltaessa käytetään yhtä isoja eroja ulko- ja jäteilmavirtojen välillä, voi tuloksena olla hyvin alipaineinen rakennus. (Järnström et al. 2017, 39.)

Ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttaman paine-eron suuruus voidaan laskea ulkoilma- ja jätevirtojen erotuksesta ottaen huomioon vaipanpitävyys. Poistoilmavirtojen ollessa suuremmat kuin tuloilmavirrat, aiheutuu rakennukseen alipaine. Jos taas tuloilmavirrat ovat suuremmat kuin poistoilmavirrat, syntyy ylipaine. (Stanke & Bradley 2002, 3.)

## **2.2 Terminen paine-ero**

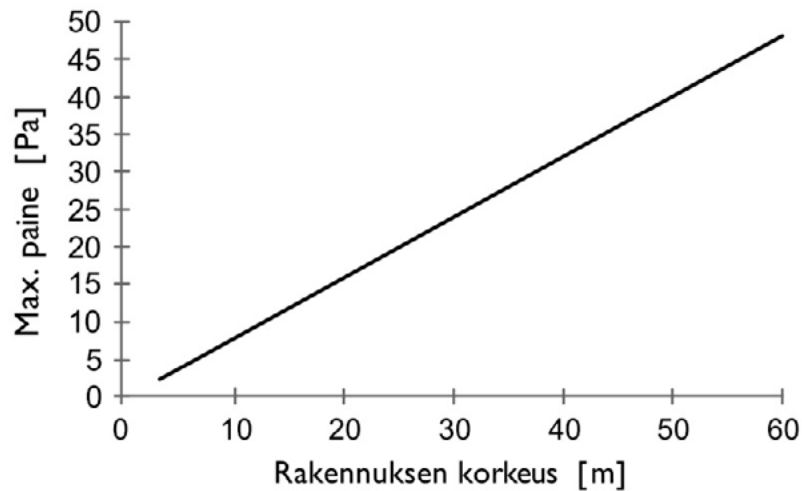
Terminen paine-ero eli hormivaikutus perustuu ilman lämpötilaan ja tiheyteen. Lämpimän ilman tiheys on pienempi ja tällöin ilma pyrkii siirtymään ylöspäin. Ilman siirtyessä ylöspäin, ylhäälle muodostuu ylipainetta ja alhaalle taas alipainetta (kuva 1). Näiden yli- ja alipainetilanteen välissä sijaitsee neutraaliakseli, jossa on sama ilmanpaine kuin ulkona. Täysin tiiviissä rakenteessa neutraaliakseli sijaitsee huoneen keskellä. Käytännössä neutraaliakselin tarkan sijainnin määrittäminen on vaikeaa, koska siihen vaikuttavat ikkunat, ilmanvaihtokanavat, tulisijat, hormit ja muut aukotukset rakenteessa. (Siikanen 2014, 35.)



Kuva 1. Sisä- ja ulkoilman lämpötilaerojen aiheuttama paine-erojakauma (Kattoliitto ry 2013, 10).

Hormivaikutus näkyy erityisesti korkeissa rakennuksissa, ja vaikka sen aiheuttama paine-ero voi olla pieni, se on kuitenkin hyvin pysyvä tilanne. Esimerkiksi korkeissa rakennuksissa yhteinen porrashuone voi aiheuttaa hormivaikutuksen ja näin aiheuttaa ylipaineen yläkertaan ja alipaineen alakertaan. Jos kerrosten välit ovat hyvin tiiviit eikä ilmapuotoja ole, savupiippuvaikutus näkyy vain kerroskohtaisesti. (Siikanen 2014, 36-37.) Hormivaikutuksen merkitykseen vaikuttaa luonnollisesti sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero. Ero on suurin talvisin, joten silloin myös hormivaikutus on suurimmillaan. Kuvassa 2 lämpötilaero ulko- ja sisäilman välillä on 20 °C ja siitä voidaan nähdä, että hormivaikutuksen aiheuttama ylipaine voi korkeissa rakennuksissa olla merkittävä. Esimerkiksi kolmekerroksisessa kerrostalossa hormivaikutuksen aiheuttama paine-ero voi olla jopa 10 Pa talvella.





Kuva 2. Suurin hormivaikutuksen aiheuttama ylipaine sisä- ja ulkolämpötilaeron ollessa 20 °C (Holmström et al. 2016, 121).

Hormivaikutuksen suuruus voidaan laskea ulko- ja sisäilman tiheyden, etäisyyden neutraaliakselista ja maan vetovoiman kiihtyvyyden avulla seuraavasti:

$$\Delta P_s = (\rho_u - \rho_s) \cdot h \cdot g \quad (2)$$

jossa

$\Delta P_s$  = paine-eron suuruus [Pa]

$\rho_u$  = ulkoilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_s$  = sisäilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$h$  = etäisyys neutraaliakselista [m]

$g$  = maan vetovoiman kiihtyvyys [m/s<sup>2</sup>] (Siikanen 2014, 36-37).

Vaihtoehtoisesti etäisyys neutraaliakselista voidaan korvata referenssitason ja mittaustason korkeusasemien erotuksella.

Ilman tiheys taas saadaan laskettua lämpötilan avulla:

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (3)$$

jossa

$\rho$  = ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$M$  = ilman moolimassa 29 kg/kmol

$p$  = ilmanpaine [Pa]

$R$  = yleinen kaasuvakio 8315 J/kmolK

$T$  = absoluuttinen lämpötila [K]

(Björkroth & Eskola 2019, 36).

Ilmanpaine eri korkeuksissa saadaan taas seuraavalla tavalla:

$$p = p_0 \cdot e^{-h \cdot g \cdot \frac{\rho_0}{p_0}} \quad (4)$$

jossa

$p$  = ilmanpaine korkeudella  $h$  [Pa]

$p_0$  = ilmanpaine maan pinnalla [Pa]

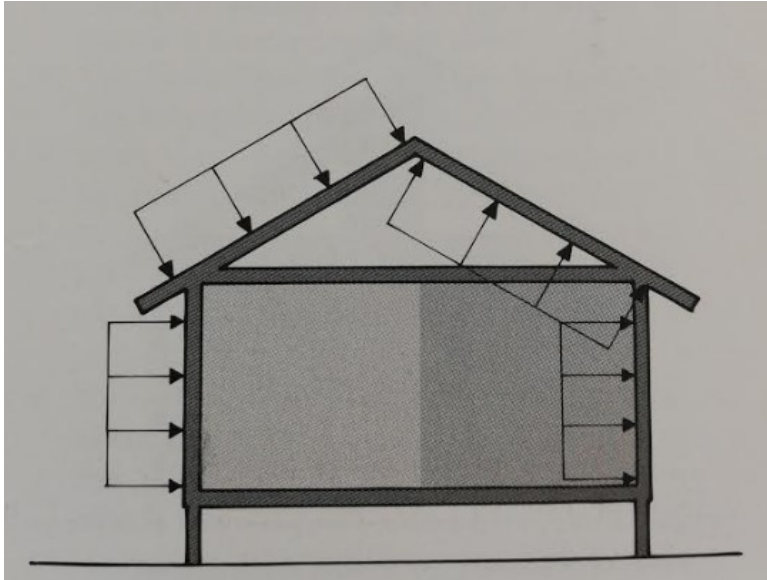
$\rho_0$  = ilman tiheys maan pinnalla [kg/m<sup>3</sup>] ( $t = 0$  °C,  $p_0 = 101,325$  kPa)

$h$  = korkeus [m]

$g$  = putoamiskiiktyvyys [m/s<sup>2</sup>]

### 2.3 Tuuli

Tuulen aiheuttamaan paine-eroon rakennusvaipan yli vaikuttavat useat eri tekijät. Tuulen suunnalla ja suuruudella on vaikutus, mutta myös ympäröivillä rakennuksilla ja maastolla sekä rakennuksen korkeudella ja muodolla. Tuulen aiheuttama paine-ero on myös hyvin vaihtelevaa, joten sen huomioon ottaminen on haastavaa. Tuuli vaikuttaa yleensä sisätiloissa niin, että tuulen puolella olevalla seinällä sisällä on alipaine ja suojaisella puolella ylipaine (kuva 3). Tähän vaikuttaa kuitenkin vahvasti tuulen pyörteet, joten tarkkaa painekuviota on vaikea muodostaa. (Siikanen 2014, 37.)



Kuva 3. Tuulen painevaikutus (Siikanen 2014, 37).

Tuulen aiheuttama paine ulkoseinämällä voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\Delta P_w = C_p \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (5)$$

jossa  $\Delta P_w$  = paine-eron suuruus [Pa]

$C_p$  = rakennuksen muodosta ja tuulen suunnasta riippuva vakio

$\rho$  = ulkoilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$v$  = tuulen nopeus [m/s]

(Siikanen 2014, 10).

Rakennuksen muodosta ja tuulen suunnasta riippuvaa vakiota ei pystytä täysin sanomaan, mutta Svenska Byggnorm määrittää seuraavat arvot:

- tuulenpuoleinen seinä +0,7
- suojanpuoleinen seinä -0,5
- tuulen suuntainen seinä -0,6...-1,2 (Siikanen 2014, 10).

## 2.4 Rakennuksen tiiveys ja rakenteelliset keinot

Ilmanpaine pyrkii aina tasoittumaan tilassa, joten mitä tiiviimpi on rakennuksen vaippa, sitä enemmän syntyy paine-eroa yllä mainituista tekijöistä. Hyvin epätiivieissä rakennuksissa paine-erot ulkoilman välillä pyrkivät tasoittumaan ilmanvuotokohtien kautta, joten suuria paine-eroja ei muodostu tällaisissa

kohteissa. (Kuntien sisäilmaverkosto 2019, 19) Toisaalta jos rakennus on hyvin tiivis, myös kerrosten välillä, suurin vaikutus paine-eroihin on ilmanvaihdolla. Tuulen ja hormivaikutuksen merkitys pienenee tällöin merkittävästi. (Hagentoft 2001, 84.) Samalla paine-erojen hallittavuus kasvaa, kun kyseessä on vain ilmanvaihdosta johtuva paine-ero.

Paine-eroja voidaan yrittää hallita myös rakenteellisin keinoin. Rakenteelliset keinot tarkoittavat käytännössä sisätilojen tiiveyttä muodostavia elementtejä, jotka estävät ilman siirtymistä sisätiloissa. Tällaisia elementtejä ovat esimerkiksi sisäseinät ja osastoinnit niiden avulla, tuulikaapit sekä hissikuilujen eristäminen muista tiloista. Mitä suurempia virtausreittejä ilmalla on käytettävissä, sitä vaikeampaa painesuhteiden hallinta on näissä tiloissa. Joten osastoimalla voidaan painesuhteiden hallintaa helpottaa. (Ricketts, Finch, Straube 2015, 2-5.)

## **2.5 Paine-eron mittaus**

Kaikkien näiden tekijöiden yhteisvaikutus voidaan laskea, mutta käytännössä on vaikea saada tarkkoja lähtötietoja laskennan onnistumiseksi. Esimerkiksi tarkkoja tuuliolosuhteita on vaikea mitata joka kohdasta rakennuksen ulkovaippaa, rakennuksen epätiiveyskohtia eli ilmapuotoreittejä ei käytännössä tunneta eikä myöskään ilmanvaihtojärjestelmän synnyttämiä paine-eroja. (Vinha, Laukkarinen, Kaasalainen, Pihlajamaa, Teriö, Jokisalo, Annila, Harsia, Hedman, Heljo, Kallioharju, Kauppinen, Kero, Kivioja, Lehtinen, Marttila, Moisio, Mäkinen, Paatero, Raunima, Ruusala, Sankelo, Sekki Sirén, Tuominen, Tuominen, Uotila & Uusitalo 2019, 37.)

Mittaus on suositeltavaa tehdä pitkäaikaisena, koska lyhytaikaisessa mittauksessa käytön tai sään vaikutus tuloksiin voi olla suuri ja tulosta väärään suuntaan vievä. Mittaus tehdään tavanomaisissa olosuhteissa, ilmanvaihdon ollessa tavanomaisesti päällä. Tuulen vaikutuksen minimoimiseksi mittauksia pitäisi tehdä eri julkisivuilta. (Holmström, Kantola, Kauriinvaha, Kettunen, Komulainen, Laamanen, Laine, Makkonen, Niemi, Pitkäranta, Saarinen, Sandström, Tuovinen & Viljanen 2016, 87.)

### **3 Paine-erojen vaikutus rakennukseen ja sisäilmastoon**

Paine-erojen seurauksena ilma voi virrata ulkovaipan läpi ja eri huonetilojen ja kerrosten välillä. Ilmavirtaukset kuljettavat mukanaan lämpöä, kosteutta ja epäpuhtauksia (kuten mikrobiperäisiä ja kemiallisia epäpuhtauksia, radonia). (Laine 2015, 177.) Erityisesti kosteuden ja epäpuhtauksien siirtyminen hallitsemattomasti voi aiheuttaa ongelmia rakenteisiin ja/tai sisäilmastoon. Tässä luvussa käydään ensin läpi suosituksia ja määräyksiä rakennuksessa oleviin paine-eroihin. Tämän jälkeen käsitellään tarkemmin ali- ja ylipaineen mahdollisia vaikutuksia sekä rakenteisiin että sisäilmastoon.

#### **3.1 Suositukset ja määräykset paine-eroihin**

Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta todetaan pykälässä 21, että rakennus on suunniteltava siten, ettei ylipaineesta johtuvia vaurioita tapahdu rakenteissa eikä alipaineesta johtuvia epäpuhtauksien siirtymisiä tule sisäilmaan. Rakennuksen vaippa, sisärakenteiden ilmanpitävyys ja hormivaikutus olisi suunniteltava ja otettava huomioon, jotta ilmanvaihto voi toimia eikä mahdolliset epäpuhtaudet ja kosteusrasitukset siirry rakenteisiin tai sisäilmaan. Rakennuksen paine-erojen olisi siis oltava suhteellisen tasapainossa, jotta yli- tai alipainetta ei pääse syntymään.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista pykälässä kahdeksan on säädetty, että ilmanvaihdon tulee olla riittävä ja riittämätön ilmanvaihto ei saa aiheuttaa mikrobikasvun riskiä. Tämän lisäksi käyttöajan ulkopuolinen ilmanvaihto tulee olla sellainen, etteivät epäpuhtaudet kulkeudu sisäilmaan.

Asetuksesta laaditussa soveltamisohjeessa on tarkennettu määräystä. Jos rakennus on ylipaineinen, syy on selvitettävä, ellei tilanne ole hetkellinen. Jos

rakennus on alipaineinen yli 15 Pa, syy on selvitettävä ja tehtävä mahdollisesti muutoksia ilmanvaihtoon. (Valvira 2016, 18.) Sisäilmastoluokitus antaa ohjeeksi normaalin käyttöajan ulkopuolella minimi-ilmanvaihdon määrän ja yleisen ohjeistuksen, ettei ilmanvaihdolla saa muuttaa paine-eroa ulko- ja sisäilman välillä (RT 07-11299 2018, 15).

Ilmanpainesuhteilla sisä- ja ulkoilman välillä on erityisesti merkitystä kylminä vuodenaikoina, sillä silloin lämpötila- ja kosteusero ulko- ja sisäilman välillä ovat suuria. Lämpimänä aikana sisä- ja ulkolämpötilan ollessa lähellä toisiaan, paine-erojen merkitys on pienempi. (Siikanen 2014, 34.)

### **3.2 Alipaineen vaikutus**

Alipaine sisätiloissa voi johtaa siihen, että ilmaa tulee hallitsemattomasti erilaisten vuoto- ja epätiiveyskohtien kautta. Mitä enemmän mahdollisia epätiiveyskohtia on ja mitä suurempi alipaineisuus on ulko- ja sisäilman välillä, sitä enemmän ilmaa kulkeutuu rakenteiden läpi. Tyypillisiä epätiiveyskohtia ovat lattianraja sekä ulkoseinien liitoskohdat. Näistä kohdista alipaineisuuden vallitessa voi mahdollisesti siirtyä sisäilmaan epäpuhtauksia, sillä varsinkin rakennuksen alapohjassa on yleensä aina jotain epäpuhtauksia kuten mikrobeja tai radonia. Suodattamattomasta ulkoilmasta taas voi tulla epämiellyttäviä hajuja tai esimerkiksi pakokaasuja sisäilmaan. Ilman virratessa rakenteiden läpi riskinä on myös, että rakenteissa olevista materiaaleista siirtyy epäpuhtauksia sisäilmaan, esimerkiksi välipohjan täytöistä. (Holmström et al. 2016, 86, 118.)

Alipaineen vaikutuksesta ilmavirran virratessa kylmästä ulkoilmasta sisäänpäin syntyy myös vetoa. Tämä aiheuttaa epämukavuutta sisäilmasto-oloissa. Ilman nopeuden kasvaessa myös vedontunne kasvaa. Ilman lämpötilan noustessa vedontunnetta ei tule niin herkästi kuin alemmissä lämpötiloissa. (Siikanen 2014, 203-204.)

Alipaine voi aiheuttaa myös epämiellyttävien hajujen leviämistä toisesta tilasta toiseen tai ulkoa sisään ja jopa vaikeuttaa sisälle päin sulkeutuvien ovien sulkeutumista. Alipaineen vaikutus ei ole kuitenkaan aina pelkästään huono asia.

Talvikaudella kylmän ja kuivan ilman virratessa seinän läpi sisätiloihin, se samalla vie kosteutta rakenteista pois. (Stanke & Bradley 2002, 2.)

### 3.3 Ylipaineen vaikutus

Liiallinen pitkäkestoinen ylipaine rakennuksessa voi aiheuttaa kosteuden siirtymistä rakenteisiin. Lähtökohtaisesti kaikki rakenteet ovat sen verran epätiivittä, että niistä kulkeutuu ilmaa läpi. Rakennuksen tai tilan ollessa ylipaineinen suhteessa ulkoilmaan, ilma pyrkii virtaamaan rakennuksen sisältä ulos. Lämmin ja kostea sisäilma virtaa rakenteen kylmiin osiin ja kosteus voi kondensoitua tai kulkeutua konvektion kautta rakenteisiin. (Ojanen 2015, 366-367.) Konvektiolla tarkoitetaan sitä, että vesihöyryä kulkeutuu kaasuseoksen, tässä tapauksessa ilman, mukana rakenteen läpi. Paine-eroista johtuvaa kosteuden siirtymistä ilmavirran mukana kutsutaan pakotetuksi konvektioksi. (Siikanen 2014, 71.)

Kondensoitumista taas tapahtuu lämpötilan ja tiheyden vaikutuksesta. Lämmin ilma pystyy sitomaan itseensä enemmän kosteutta kuin kylmä ilma eli tällöin puhutaan absoluuttisesta kosteudesta. Lämpimän ja kostean ilman siirtyessä ylipaineen vaikutuksesta ulkoilmaan, ulkoilma ei pysty ottamaan vastaan kaikkea lämpimässä ilmassa olevaa kosteutta, joten tämä kosteus kondensoituu siihen pisteeseen, jossa ilman suhteellinen kosteus saavuttaa 100 %. Tämä kastepiste voi sijaita rakenteen sisällä, jolloin kosteus jää rakenteeseen. (Siikanen 2014, 71-72.) Esimerkiksi talvella sisälämpötilan ollessa +20 °C ja suhteellisen kosteuden ollessa 30 %, ilma sisältää kosteutta 5,19 g/m<sup>3</sup>. Samaan aikaan ulkona on pakkasta -20 °C ja suhteellinen kosteus on 90 %, ulkoilma sisältää vain 0,79 g/m<sup>3</sup> kosteutta. Kun ilmavirta liikkuu ja suhteellinen kosteus saavuttaa 100 %, ilman lämpötila on noin +2 °C ja tämä lämpötila saattaa sijaita juuri rakenteen sisällä, tällöin tiivistyminen tapahtuu rakenteessa ulospäin seuraavaan kiinteään pintaan.

Sen lisäksi, että rakennus on ylipaineinen ja epätiiviteyden kohtia löytyy, myös ilmanvaihdossa pitää olla ongelmia ja kosteusrasituksen kovaa. Ylipaineisuus ei siis välttämättä tarkoita automaattisesti ongelmia rakenteisiin. (Seppänen 2010,37.)

## 4 Tutkimuskysymykset

Tämän tutkimuksen aihe tuli automaatio suunnittelijoilta, jotka suunnittelevat automaatiojärjestelmään rakennuksen paine-erojen mittauksia. Paine-eromittauksen käyttö automaatiojärjestelmissä on lisääntynyt viime aikoina merkittävästi, koska enenevässä määrin on ymmärretty paine-erojen merkitys sisäilmastoon ja rakennusten terveyteen. Paine-erojen mittauksista ei kuitenkaan ole selvää ohjeistusta ja vaikka mittauksia on jo pidemmän aikaa asennettu rakennusten automaatiojärjestelmiin, niiden seuranta ja hyödyntäminen ovat jääneet vähemmälle huomiolle. Tämän työn tarkoituksena on löytää paine-eroihin eniten vaikuttavat tekijät ja sitä kautta luoda ohjeistus paine-eromittauksen suunnitteluun ja seurantaan.

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- 1) Miksi paine-eroja mitataan?
- 2) Mitä on tärkeää ottaa huomioon paine-erosuhteiden mittauksia suunnitellessa?
- 3) Kuinka paine-eromittauksien seuranta voisi parantaa ja mitä tuloksista voisi hyödyntää?

Ensimmäiseen ja toiseen tutkimuskysymykseen vastaukset löytyvät kirjallisuudesta ja mittauksista tutkimuskohteessa. Ensimmäiseen kysymykseen on vastattu teoriaosuudessa. Viimeiseen tutkimuskysymykseen hyödynnetään saatuja tuloksia.

Työ oli tutkimuksellinen opinnäytetyö ja menetelmänä käytettiin määrällistä eli kvantitatiivista tutkimusta. Aineistoa kerättiin mittauksista ja tämä mittausaineisto analysoitiin käyttämällä Excel-työkalua.

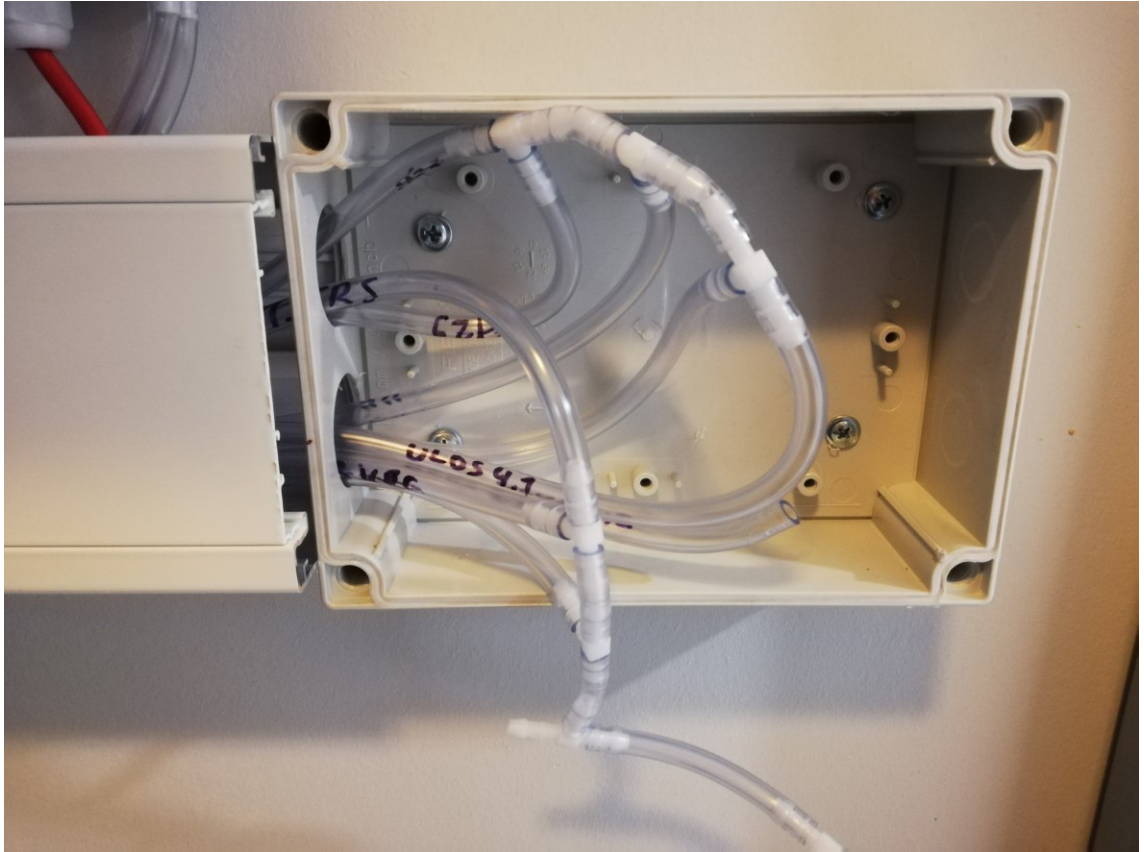


## **5 Mittaustulokset ja analyysit**

Tässä luvussa käydään läpi tutkimuskohde ja siinä suoritettut mittaukset. Mittaustuloksia analysoitiin ja verrattiin aiemmin esitettyyn teorian tietoon.

### **5.1 Tutkimuskohde**

Tutkimuskohteena oli koulurakennus Joensuussa ruutukaava-alueella. Rakennus on nelikerroksinen ja pääsääntöisesti opetuskäytössä. Koulurakennukseen tehtiin saneeraus ja sen yhteydessä lisättiin paine-eromittauspisteet. Mittauspisteitä sijoiteltiin eri kerrokseen ja eri tiloihin. Jokaisesta kerroksesta on referenssimittauspiste ulos. Neljännessä kerroksessa referenssipisteet ulos ovat sekä itä- että länsipuolella. Mittauksia on myös mahdollista käydä vaihtamassa niin, että ulkoreferenssipiste vaihtuu samasta kerroksesta yläpuolelle neljänteen kerrokseen mittauspisteen kotelossa (kuva 4). Kaikki mittauspisteet liitettiin rakennusautomaatiojärjestelmään, jonka kautta mittausdata saatiin käyttöön.



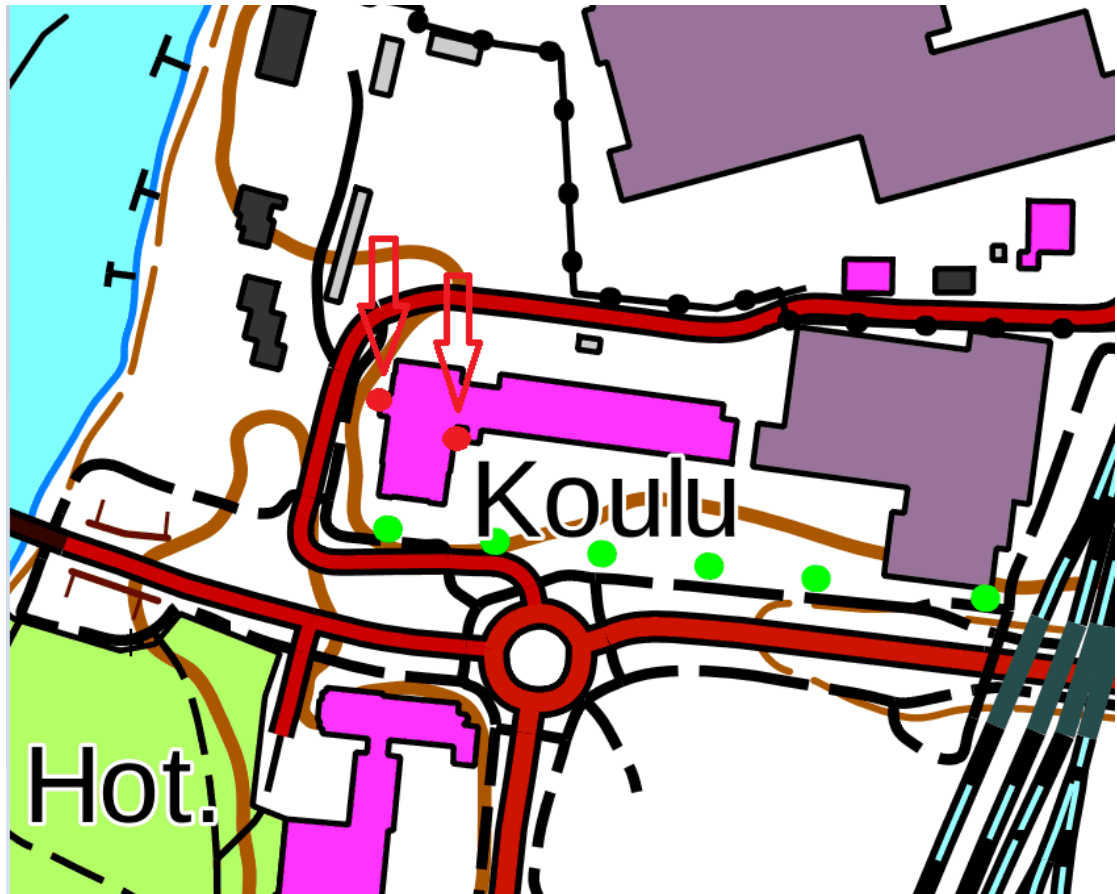
Kuva 4. Mittauspisteiden yhdistämiskotelo

Ulkoreferenssipisteet olivat koteloituna (kuva 5), jotta tuulen vaikutus mittauksiin olisi mahdollisimman pieni. Kerrosten ulkoreferenssipisteet ja mittauspisteet sisällä sijaitsivat suunnilleen samassa korkeudessa, joten tätä ei tarvinnut ottaa huomioon mittaustuloksia tarkasteltaessa.



Kuva 5. Ulkoreferenssimittauspisteen kotelointi

Mittauspisteet neljännessä kerroksessa sijaitsivat itä- ja länsipuolella rakennusta (kuva 6).



Kuva 6. Neljännessä kerroksen mittauspisteiden sijainnit kartalla

Toinen mittauspisteistä neljännessä kerroksessa sijaitsi lasitetulla, mutta lämmittämättömällä parvekkeella rakennuksen länsipuolella (kuva 7).



Kuva 7. Neljännen kerroksen länsipuolen mittauspiste

Toinen mittauspiste sijaitsi ulkoseinällä rakennuksen itäpuolella. Mittauspiste oli sijoitettu niin, että sen luokse pääsi tarvittaessa rakennuksen toisen osan katon kautta (kuva 8)





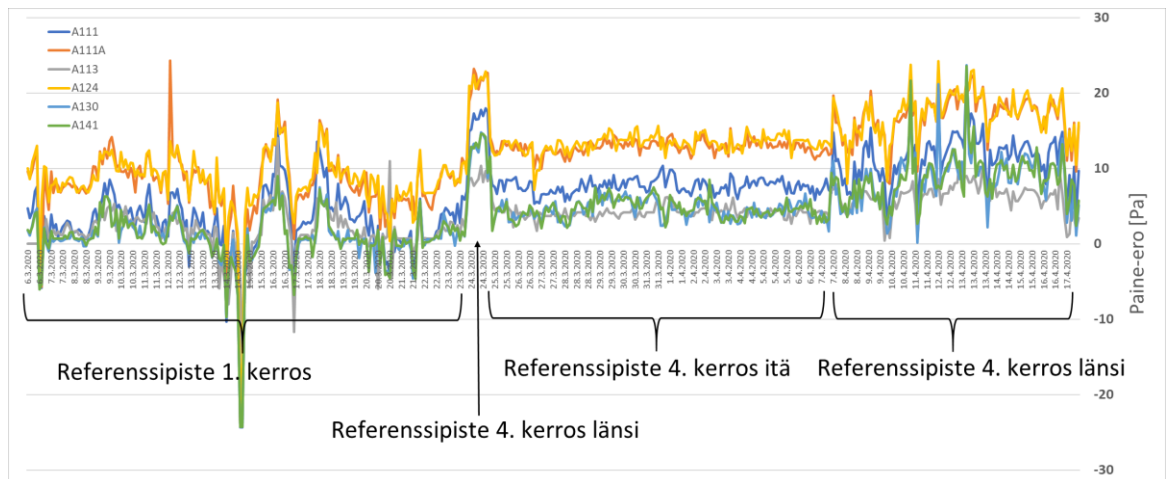
Kuva 8. Neljännen kerroksen mittauspiste itäpuolella.

## 5.2 Mittaustulokset

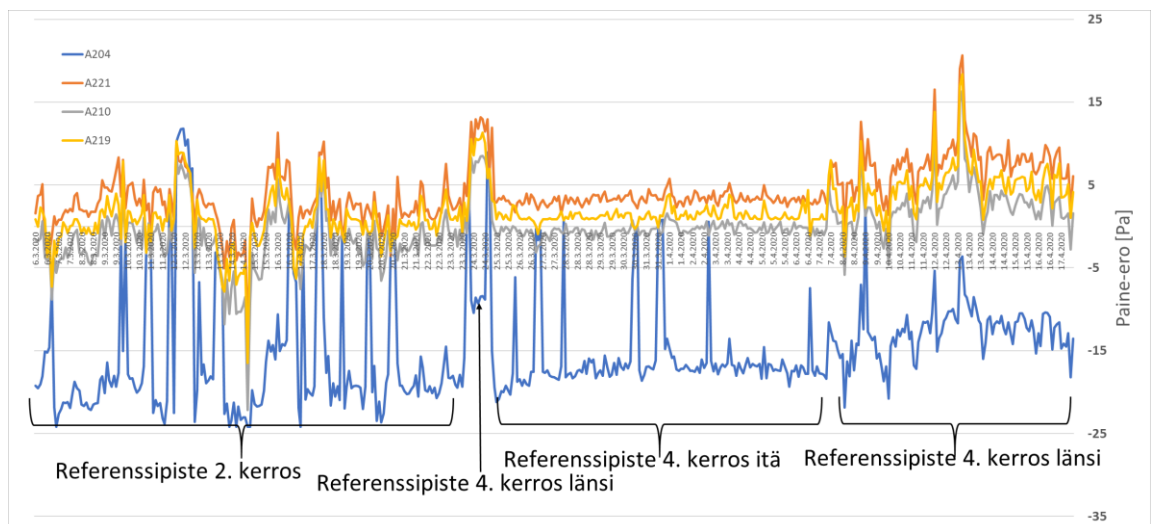
Mittaustuloksia saatiin maaliskuun alusta alkaen. Mittaukset olivat aluksi niin, että jokaisesta kerroksesta meni referenssipiste ulos. Mittaukset vaihdettiin 23.3.

siten, että referenssipiste vaihtui yläkertaan neljanteen kerrokseen länsipuolelle. Seuraavana päivänä referenssipiste vaihtui itäpuolelle neljännessä kerroksessa ja 7.4. taas länsipuolelle. Koronavirustilanteen vuoksi koulut suljettiin 16.3. alkaen, joten siitä lähtien koulun käyttö oli hyvin vähäistä. Tämä parantaa mittaustulosten luotettavuutta, sillä esimerkiksi ovien avaamiset vaikuttavat paine-eromittauksiin. Mittaustuloksia onkin tutkittu tarkemmin vasta koulun kiinni menon jälkeen.

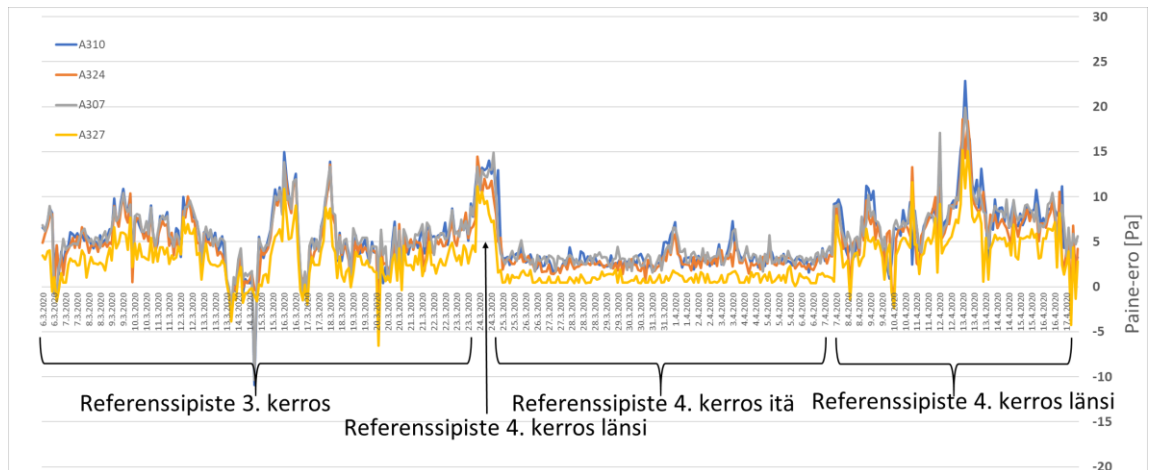
Kuvioissa 1-4 on esitetty mittaustulokset kerroksittain. 6.3.-22.3. on ajanjakso, jolloin jokaisesta kerroksesta meni referenssimittaus. 24.3.-7.4. referenssimittauspiste oli neljännessä kerroksessa itäpuolella ja 8.4.-17.4. neljännessä kerroksessa itäpuolella.



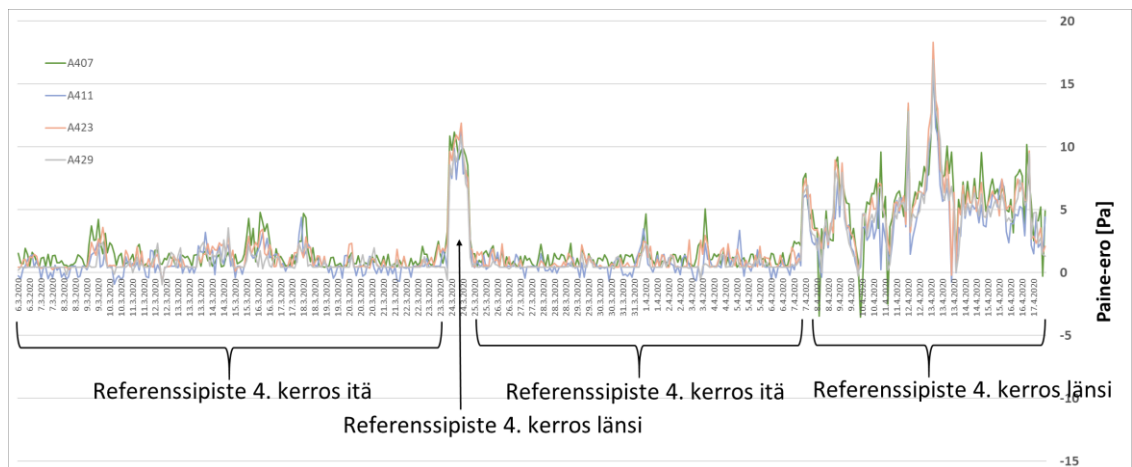
Kuvio 1. 1. kerroksen mittaustulokset 6.3.-17.4.



Kuvio 2. 2. kerroksen mittaustulokset 6.3.-17.4.



Kuvio 3. 3. kerroksen mittaustulokset 6.3.-17.4.



Kuvio 4. 4. kerroksen mittaustulokset 6.3.-17.4.

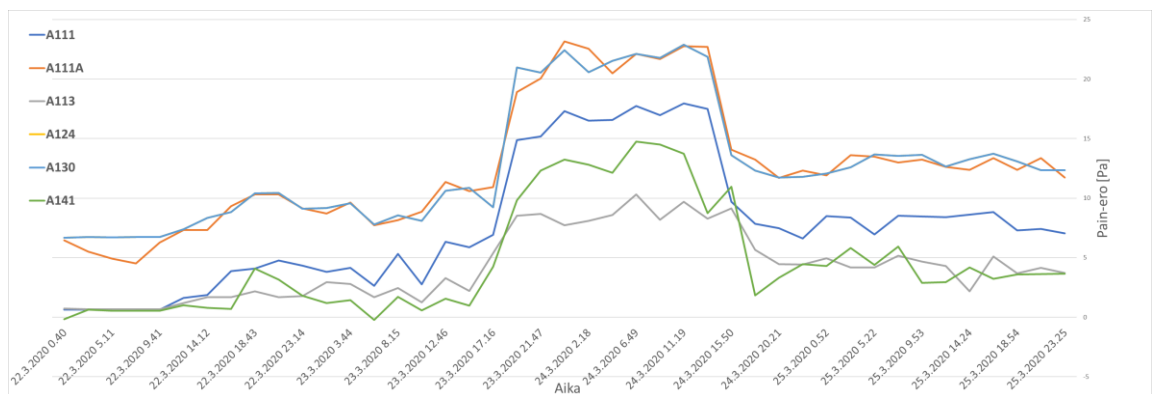
### 5.3 Referenssipisteen korkeuden vaikutus

Ensimmäisen kerroksen mittaustuloksia tarkasteltaessa pidemmän aikavälin mittauksessa ulkoreferenssipisteen ollessa ensimmäisessä kerroksessa kaikki mittauspisteet olivat keskiarvillisesti 3,9 Pa ylipaineisia. Mutta ulkoreferenssipisteen muuttuessa neljänteen kerrokseen itäpuolelle ylipaineisuus kasvoi 8,3 pascaliin (taulukko 1). Länsipuolella mittauspisteiden keskiarvo oli 11,6 Pa ylipaineinen. Ylipaineisuus siis kasvoi 4-7 pascalia riippuen neljännen kerroksen mittauspisteen ilmansuunnasta.

Taulukko 1. Mittaustulosten keskiarvoja 1. kerroksesta [Pa]

Aikaväli	16.3.-22.3.	24.3.-7.4.	8.4.-17.4.
Referenssipiste	kerroksesta	4.2 itä	4.1 länsi
<b>A111</b>	3,4	8,1	11,4
<b>A111A</b>	8,0	13,3	17,0
<b>A113</b>	1,9	4,4	6,2
<b>A124</b>	8,5	13,7	17,3
<b>A130</b>	0,7	4,9	8,7
<b>A141</b>	0,7	5,1	8,8
<b>Mittauspisteiden keskiarvo</b>	<b>3,9</b>	<b>8,3</b>	<b>11,6</b>

Tarkasteltaessa tilannetta päivätasolla kuviossa 5 näkyy ensimmäisen kerroksen tilanne, kun referenssipiste vaihdettiin ensimmäisestä kerroksesta neljanteen kerrokseen, ensin länsipuolelle ja sitten itäpuolelle. Länsipuolelle vaihto tapahtui 23.3. n. klo 15.



Kuvio 5. 1. kerroksen mittaustuloksia

Vaihdettaessa ulkoreferenssipiste yläkertaan länsipuolelle, ensimmäisen kerroksen paine-erot kasvoivat 9 pascalista 11 pascaliiin, keskimääräisesti kaikissa pisteissä noin 9 Pa ylipaineiseiksi.

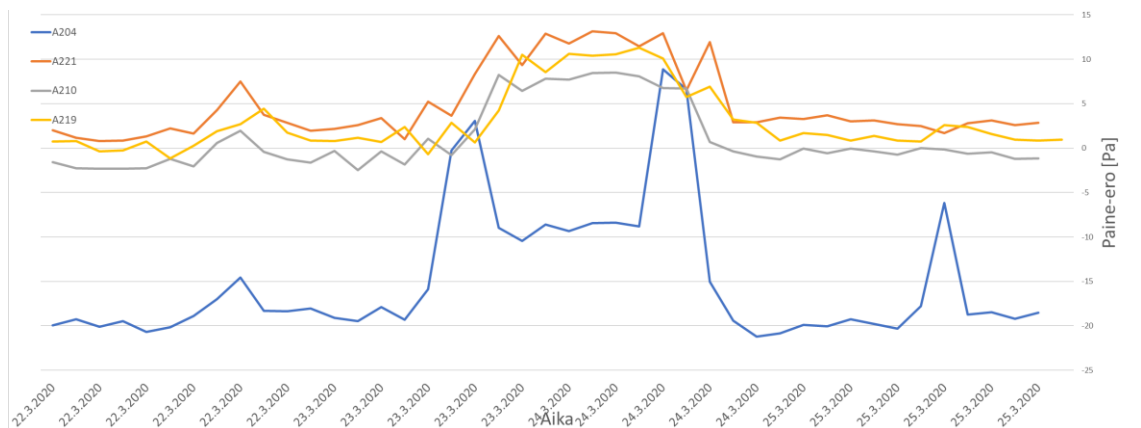
Toisessa kerroksessa pidemmän aikavälin mittaustuloksissa ylipaineisuus kasvoi huomattavasti vähemmän (taulukko 2). Itäpuolen neljännen kerroksen referenssipisteeseen vaihtaminen vaikutti tuloksiin noin 1 pascalin verran. Länsipuolen mittaustulokset kasvoivat 4 pascalin verran.



Taulukko 2. Mittaustulosten keskiarvoja 2. kerroksesta [Pa]

Aikaväli	16.3.-22.3.	24.3.-7.4.	8.4.-17.4.
Referenssipiste	kerroksesta	4.2 itä	4.1 länsi
<b>A204</b>	-15,7	-15,4	-12,5
<b>A221</b>	2,6	3,7	7,7
<b>A210</b>	-1,6	0,0	2,7
<b>A219</b>	0,6	1,7	5,0
<b>Mittauspisteiden keskiarvo</b>	<b>-3,5</b>	<b>-2,5</b>	<b>0,7</b>

Katsoessa tilannetta toisessa kerroksessa päiväkohtaisesti (kuvio 6) paine-erot kasvoivat myös ylipaineisemmaksi; mittauspisteestä riippuen 6-13 Pa, keskimäärin 8,5 Pa.



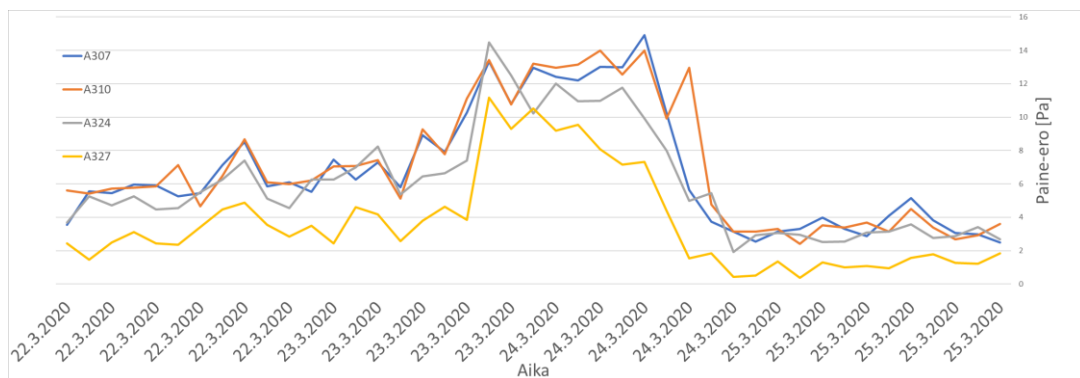
Kuvio 6. 2. kerroksen mittaustuloksia.

Kolmannen kerroksen mittauksissa itäpuolelle neljänteen kerrokseen vaihtaminen muuttikin mittaustuloksia alipaineisemmaksi; keskimäärin 1,5 pascalia (taulukko 3). Neljännen kerroksen länsipuolen referenssimittauspisteen ja kerroksissa olevan referenssimittauspisteen ero taas oli ylipaineista; yläkertaan vaihdettaessa tulokset muuttuivat ylipaineisemmaksi keskimäärin yli 2 pascalia.

Taulukko 3. Mittaustulosten keskiarvoja 3. kerroksesta [Pa]

Aikaväli	16.3.-22.3.	24.3.-7.4.	8.4.-17.4.
Referenssipiste	kerroksesta	4.2 itä	4.1 länsi
<b>A307</b>	5,4	3,7	7,8
<b>A310</b>	5,1	3,6	7,9
<b>A324</b>	4,7	3,1	6,9
<b>A327</b>	2,8	1,3	4,9
<b>Mittauspisteiden keskiarvo</b>	<b>4,5</b>	<b>2,9</b>	<b>6,9</b>

Päiväkohtaisessa tarkastelussa kolmannen kerroksen mittauksissa paine-erot muuttuivat ylipaineisemmaksi 4-5 Pa (kuvio 7).



Kuvio 7. 3. kerroksen mittaustuloksia

Mittaustulokset eivät ole yllättäviä vaan todistavat teoriaa oikeaksi eli terminen paine-ero vaikuttaa tuloksiin. Jo tässä vaiheessa voidaan todeta, että referenssimittauspiste kannattaa siis sijaita kerroskohtaisesti, jos mahdollista. Termisen paine-eron vaikutus voidaan myös laskea kaavoilla 2, 3 ja 4. Tässä tapauksessa ensimmäisen kerroksen tulokset terminen paine-ero korjattuna ovat taulukossa 4. Referenssipisteen ollessa neljännen kerroksen itäpuolella, kaikkien mittauspisteiden korjattujen mittaustulosten paine-erojen keskiarvo oli 0,1 pascalia ja länsipuolella 4,1 pascalia.

Taulukko 4. 1. kerroksen paine-eromittaukset korjattuna [Pa]

Aikaväli	Referenssipiste	Mittauspisteen keskiarvo						Kaikkien mittauspisteiden keskiarvo
		A111	A111A	A113	A124	A130	A141	
24.3.-7.4.	4.2 itä	-0,1	5,1	-3,8	5,5	-3,2	-3,1	0,1
8.4.-17.4.	4.1 länsi	3,9	9,5	-1,4	9,8	1,2	1,3	4,1

2. kerroksen korjatut mittaustulokset ovat taulukossa 5. Kaikkien mittauspisteiden keskiarvo referenssipisteen ollessa neljännen kerroksen itäpuolella on -7,5 pascalia ja länsipuolella -3,9 pascalia.

Taulukko 5. 2. kerroksen paine-eromittaukset korjattuna [Pa]

Aikaväli	Referenssipiste	Mittauspisteen keskiarvo				Kaikkien mittauspisteiden keskiarvo
		A204	A221	A210	A219	
24.3.-7.4.	4.2 itä	-19,9	-1,5	-5,2	-3,5	-7,5
8.4.-17.4.	4.1 länsi	-15,8	2,3	-2,1	-0,1	-3,9

3. kerroksen korjatut mittaustulokset löytyvät seuraavasta taulukosta 6. Kolmannessa kerroksessa kaikkien mittauspisteiden keskiarvo korjattuna referenssipisteen ollessa neljännen kerroksen itäpuolella oli 0,5 pascalia ja länsipuolella 4,6 pascalia.

Taulukko 6. 3. kerroksen paine-eromittaukset korjattuna [Pa]

Aikaväli	Referenssipiste	Mittauspisteen keskiarvo				Kaikkien mittauspisteiden keskiarvo
		A307	A310	A324	A327	
24.3.-7.4.	4.2 itä	1,3	1,2	0,7	-1,2	0,5
8.4.-17.4.	4.1 länsi	5,4	5,6	4,7	2,6	4,6

Kun näitä terminen paine-ero korjattuja tuloksia verrataan tilanteeseen, jossa referenssipiste on ollut suoraan kerroksesta ulos, nähdään helposti, että neljännen kerroksen länsipuolen mittauksista saatu data on korjattuna hyvin lähellä kerroksista saatuun dataan. Ensimmäisessä kerroksessa referenssipisteen ollessa suoraan kerroksessa, kaikkien mittauspisteiden keskiarvo oli 3,9 pascalia kun taas korjattujen paine-erodataojen keskiarvo länsipuolen mittauksissa oli 4,1 pascalia. Toisessa kerroksessa samat arvot olivat -3,5 pascalia ja -3,9 pascalia. Kolmannessa kerroksessa taas referenssipisteen ollessa kerroskohtainen, keskiarvo oli 4,5 pascalia ja korjattujen mittaustulosten keskiarvo länsipuolella 4,6 pascalia. Samoin verrattaessa yksittäisten mittauspisteiden keskiarvoja referenssipisteen ollessa

kerroksesta suoraan ulos ja korjattua mittausdataa länsipuolelle, voidaan huomata tässäkin tapauksessa, että tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan. Mittaustulokset eivät toki ole täysin verrattavissa, koska mittaukset ovat tehty eri aikaan ja lämpötilat sekä tuuliolosuhteet ovat olleet erilaiset. Keskiarvillisesti toinen mittausjakso 24.3.-7.4. oli noin 1,2 astetta lämpimämpi ja kolmas mittausjakso 8.4.-17.4. oli ensimmäistä mittausjaksoa keskiarvillisesti noin 2,6 astetta lämpimämpi. Nämä lämpötilatulokset ovat otettu referenssimittauspisteiden yhteydessä olevista lämpötilamittauksista. Koska osa referenssimittauspisteistä sijaitsevat lasitetulla parvekkeella, eivät nämä lämpötilamittauksetkaan ole täysin verrattavissa.

#### **5.4 Ilmansuunnan vaikutus mittaustuloksiin**

Vaihdettaessa referenssipistettä neljännessä kerroksessa itäpuolelta länsipuolelle ja toisin päin, mittaustuloksissa tapahtui suhteellisen suuria muutoksia. Mittaustuloksia on taulukossa 7 verrattu referenssipisteen ollessa neljännessä kerroksessa länsipuolella ja itäpuolella. Mittaustuloksista on laskettu keskiarvot ja taulukosta voidaan nähdä, että mittaustulokset länsipuolella ovat kerroksesta ja mittauspisteestä riippumatta keskimäärin noin 3-4 pascalia ylipaineisemmat.

Taulukko 7. Itä- ja länsipuolen mittauksien vertailua

	4.2 itä	4.1 länsi	Länsipuolen mittaus ylipaineisempi [Pa]
<b>A111</b>	8,1	11,4	3,3
<b>A111A</b>	13,3	17,0	3,7
<b>A113</b>	4,4	6,2	1,7
<b>A124</b>	13,7	17,3	3,6
<b>A130</b>	4,9	8,7	3,8
<b>A141</b>	5,1	8,8	3,8
		<b>Keskiarvo</b>	<b>3,3</b>
	4.2 itä	4.1 länsi	Länsipuolen mittaus ylipaineisempi [Pa]
<b>A204</b>	-15,4	-12,5	2,8
<b>A221</b>	3,7	7,7	3,9
<b>A210</b>	0,0	2,7	2,7
<b>A219</b>	1,7	5,0	3,3
		<b>Keskiarvo</b>	<b>3,2</b>
	4.2 itä	4.1 länsi	Länsipuolen mittaus ylipaineisempi [Pa]
<b>A307</b>	3,7	7,8	4,0
<b>A310</b>	3,6	7,9	4,2
<b>A324</b>	3,1	6,9	3,8
<b>A327</b>	1,3	4,9	3,6
		<b>Keskiarvo</b>	<b>3,9</b>
	4.2 itä	4.1 länsi	Länsipuolen mittaus ylipaineisempi [Pa]
<b>A411</b>	1,0	4,5	3,5
<b>A423</b>	1,3	5,5	4,2
<b>A407</b>	1,5	5,8	4,3
<b>A429</b>	1,0	5,1	4,1
		<b>Keskiarvo</b>	<b>4,0</b>

Yksi selittävä tekijä näille mittausarvojen eroavaisuuksille voi löytyä tuulesta. Tuuli voi vaikuttaa paine-eroihin huomattavastikin. Tuulen vaikutuksen huomioiminen tuloksissa on kuitenkin haastavaa; käytössä pitäisi olla paikan tarkat tuulidatat, huomioon pitäisi myös ottaa rakennuksen muoto ja ympärillä olevat rakennukset tai muut esteet. Myös ikkuna- ja oviaukkojen sijainnilla on merkitystä tuulen vaikutukseen paine-eroissa. Seinän tiiveys vaikuttaa myös tuloksiin.

Tuulen vaikutusta yritettiin kuitenkin huomioida Ilmatieteen laitokselta saatavan tuulidatan avulla. Lähin rakennusta sijaitseva mittauspiste, josta tuulidataa sai, oli lentokentällä reilun kymmenen kilometrin päässä. Tuulimittaus tehdään yleensä noin 10 metriä maanpinnasta tai ympäristön esteiden yläpuolella, joten tuulennopeus otettiin datasta suoraan, koska tuulennopeuden kasvua alkaa tulla vasta 10 metrin jälkeen. Yleisin tuulensuunta rakennuksen paikkakunnalla on

länneestä/lounaasta, kuten Suomessa yleisesti. Tuulen vaikutusta tuloksiin laskettiin kaavan 5 avulla.

Rakennuksen muodosta ja tuulen suunnasta riippuvana vakiona käytettiin tuulenpuoleisella seinällä arvoa +0,7 ja suojanpuoleisella seinällä arvoa -0,5. Tuulen suunta on tuulidatassa ilmoitettu asteina; kun tuulen astearvo on 0, puhaltaa tuuli suoraan pohjoisesta etelään. Tuulennopeutena käytettiin Ilmatieteen laitoksen tuulidatasta saatua tuulennopeutta. Tuulen suuntaan ja nopeuteen vaikuttavat myös rakennuksen ympärillä olevat muut rakennukset tai esteet. Myös pyörteitä syntyy kaupunkiympäristössä helposti. Näitä ei kuitenkaan otettu laskelmissa huomioon, sillä niiden arviointi ja vaikutus tuloksiin olisi vaatinut tuulimittauksia paikan päällä.

Tuulen vaikutusta laskettiin neljännen kerroksen mittaustuloksia hyödyntäen. Näin saatiin eliminoitua hormivaikutuksen tuottama ero mittaustuloksiin. Referenssimittauspisteen ollessa itäpuolella, tuuli oli käytännössä melkein koko ajan niin, että mittauspiste on tuulen suojaisella seinällä, keskiarvallisesti tuulen suunta oli 247 astetta mittausjaksolla. Tuulen nopeuden keskiarvo oli mittausjaksolla 4,2 m/s. Keskimääräinen seinään kohdistuva paine oli -5 pascalia. Tämä tarkoittaa, että rakennuksen sisälle aiheutuu 5 pascalin ylipaine tuulen vaikutuksesta.

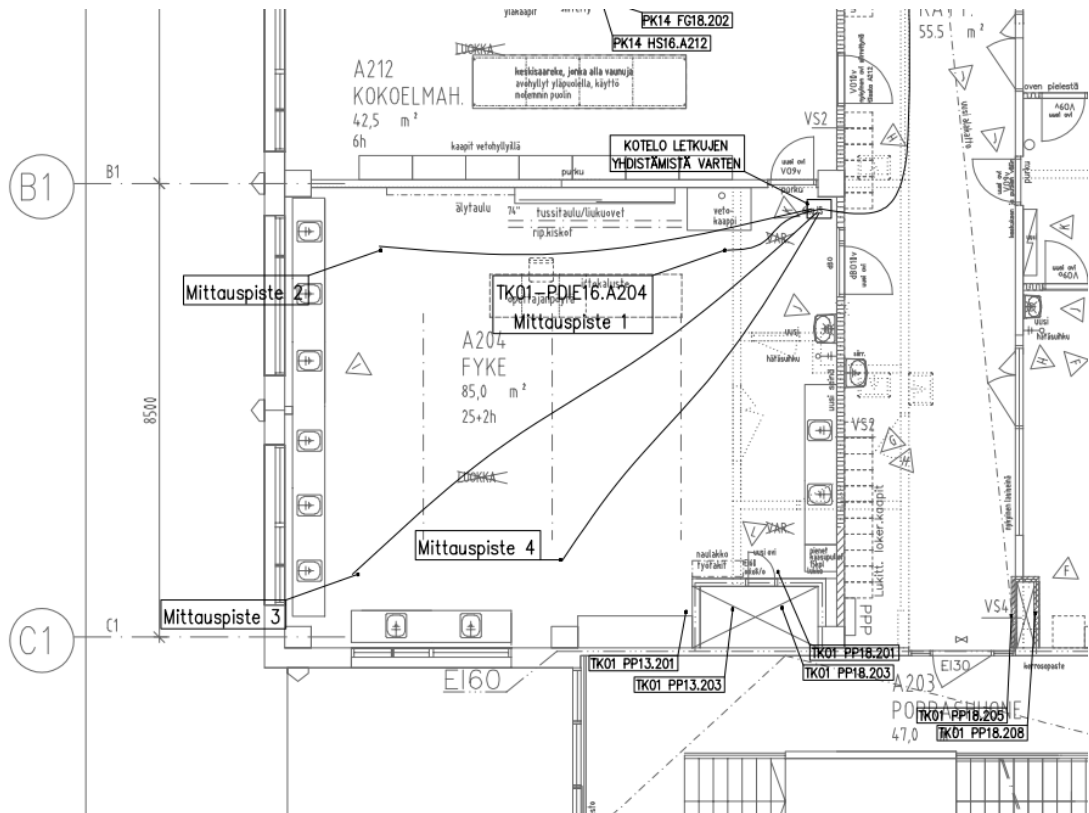
Referenssimittauspisteen ollessa länsipuolella, tuulen suunta oli asteina keskiarvallisesti 228 astetta, mikä tarkoittaa tuulen suuntana lounastuulta. Tuulen nopeus oli keskiarvallisesti 3,5 m/s. Keskimääräinen seinään kohdistuva vaikutus oli 2,2 pascalia ja kääntäen sisätiloissa aiheutuu 2,2 pascalin alipaine.

Tuulenpuoleisen seinän tiloihin tuulen vaikutuksesta sisälle kohdistui siis noin 2,2 pascalin alipaine ja suojanpuoleisen seinän tiloihin kohdistui tuulen vaikutuksesta 5 pascalin ylipaine. Tästä saadaan, että rakennukseen kohdistui tuulen vaikutuksesta 2,8 pascalin ylipaine. Tämä selittänee myös mittaustulosten eroavaisuuden referenssipisteen sijaitessa itä- tai länsipuolella. Eroavaisuutta itä- ja länsipuolen mittauksen välillä oli n. 3-4 Pa. Referenssipisteen sijainnilla ilmansuunnan suhteen on siis mittaustuloksiin merkitystä. Yleisesti näistä

tuloksista huomataan, että tuulen vaikutuksen huomioon ottaminen on haasteellista ja vaatisi tarkempaa tuulen mittausdataa paikan päältä.

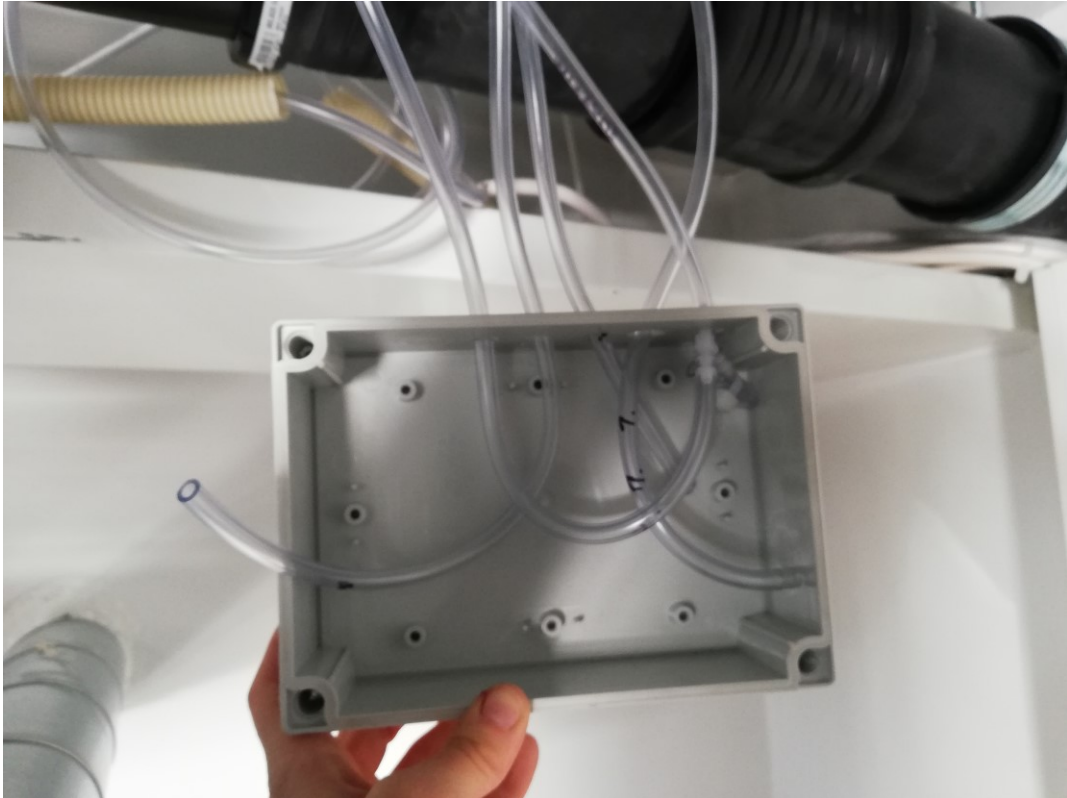
## 5.5 Paikan vaikutus tilassa

Yhteen luokkatiloista asennettiin vaihtoehtoisia mittauspisteitä, jotka näkyvät kuvassa 8. Mittauspiste 1 sijaitsi heti oven edessä kauimpana ikkunasta poistoilmalaitteen läheisyydessä, mittauspiste 2 sijaitsi lähellä ikkunaa ja tuloilmalaitetta. Mittauspiste 3 sijaitsi myös ikkunan lähellä ja läheisyydessä sijaitsi myös tuloilmalaite. Mittauspiste 4 oli keskenmällä luokkahuonetta eikä välittömässä läheisyydessä sijainnut ilmanvaihdon päätelaitetta.



Kuva 8. Mittauspisteet luokkahuoneessa

Kaikki mittauspisteet olivat tuotu samaan koteloon (kuva 9). Kotelossa voitiin yksi mittauspisteistä yhdistää paine-eromittarille menevään letkuun.



Kuva 9. Kotelo mittauspisteen yhdistämistä varten

Näiden mittauspisteiden vaikutusta tuloksiin testattiin vaihtamalla mittauspisteitä vuorotellen. Kotelossa vaihdettiin yksi mittauspiste kerrallaan, annettiin tilanteen rauhoittua ja katsottiin, miten mittauspisteen vaihto vaikutti paine-eromittautulokseen. Nämä vaihdot tehtiin koulun ollessa suljettuna ja peräkkäin, joten kaikissa mittausilanteissa tilanne oli sama. Mittauspisteen vaihdolla ei ollut vaikutusta paine-eromittauksen tulokseen, kaikista pisteistä saatiin sama paine-eromittautulos. Joten voidaan olettaa, että mittauspisteen sijainnilla tilassa ei ole niin suurta merkitystä tuloksiin, että siihen tarvitsisi kiinnittää huomiota.

Myös mittauspisteen korkotason vaikutusta testattiin tässä samaisessa tilassa ja tilanteessa. Yhden mittauspisteen letkun pää laskettiin noin 1,5 metrin korkeuteen, kun muuten mittauspisteet sijaitsivat noin 2,5 metrin korkeudessa (kuva 10). Tälläkään ei huomattu olevan vaikutusta mittaustuloksiin.



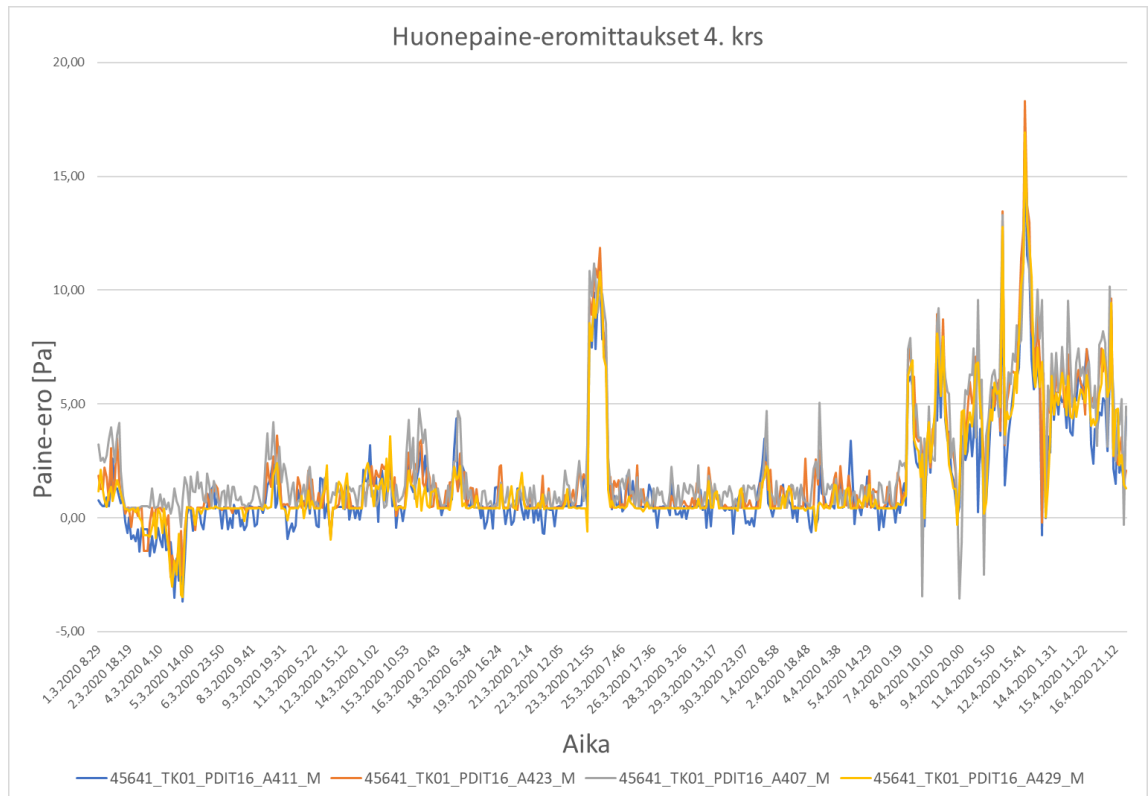


Kuva 10. Mittauspisteen lasku alemmas

## 5.6 Mittaustulosten tulkinta

Mittaustulosten tulkinnessa on tärkeää ymmärtää, että paine-eroihin vaikuttavat niin monet asiat, että tuloksia ei pidä tulkita liian äkkinäisesti. Tuloksia pitää ensinnäkin tarkastella riittävän pitkällä aikavälillä, jotta mahdolliset sääolosuhteet tai käyttäjän aiheuttamat toimet eivät vääristä tuloksia. Hetkelliset piikit tuloksissa aiheutuvat todennäköisesti tuulesta tai esimerkiksi oven tai ikkunan aukaisusta ja ne tulisi suodattaa pois.

Mittaustulosten tulkinnessa isossa roolissa on se, kuinka data esitetään. Kuviossa 8 on neljännen kerroksen mittaustulokset aikaväliltä 1.3.-17.4.



Kuvio 8. Neljännen kerroksen mittaustuloksia

Tällaisesta graafisesta kuviosta pystyy jossain määrin päättämään yleisesti, onko tila enemmän yli- vai alipaineinen. Tarkempi tulkinta on kuitenkin vaikeaa, varsinkin jos samassa graafissa on useampi mittauspiste. On vaikea tulkita, kuinka paljon ja mitkä mittauspisteet ovat yli- tai alipaineisia.

Rakennusautomaatiojärjestelmissä on usein myös paine-eromittauksille asetetut hälytysrajat. Näiden hälytysrajojen ongelmana on kuitenkin se, että mittauksissa esiintyy kohteesta riippuen piikkejä, jotka johtuvat esimerkiksi oven avauksesta tai tuulesta ja nämä piikit aiheuttavat hälytyksiä. Kun hälytyksiä tulee usein ja tällä tavalla aiheuttomasti, niihin ei enää reagoida. Esimerkiksi jos tarkastellaan neljännen kerroksen mittaustuloksia ylhäällä olevalla aikavälillä ja hälytysrajoiksi asetetaan +10 Pa ja -10 Pa, niin hälytyksiä tältä ajalta olisi tullut 34 kertaa.

Kuitenkin tuloksia lähemmin tarkasteltaessa huomataan, että paine-erot kaikissa mittauspisteissä ovat olleet hyvin lähellä nollaa (taulukko 8). Keskiarvillisesti pisteet ovat olleet 1,5-2,4 Pa ylipaineisia ja pisteiden mediaanit ovat olleet 0,4-1,3. Mielenkiintoisin huomio on ehkä se, että lähes kaikki pisteet ovat olleet lähes koko ajan ylipaineisia, vaikkakin hyvin lievästi.

Taulukko 8. Neljännen kerroksen mittauspisteiden tulokset

	45641_TK01_PDIT16 _A411_M	45641_TK01_PDIT16 _A423_M	45641_TK01_PDIT16 _A407_M	45641_TK01_PDIT16 _A429_M	Kaikki pisteet
<b>Keskiarvo</b>	1,5	2,0	2,4	1,7	1,9
<b>Mediaani</b>	0,6	1,0	1,3	0,4	0,9
<b>Ylipaineinen</b>	81 %	97 %	99 %	95 %	93 %
<b>Alipaineinen</b>	19 %	4 %	1 %	5 %	7 %

Mittausvälillä on myös merkitystä tuloksiin. Jos edellä olevia samoja tuloksia tarkastellaan kuukausi- tai viikkotasolla, saadaan hieman eriäviä tuloksia. Taulukossa 9 on neljännen kerroksen mittauspisteiden tulokset maaliskuun aikana. Edelleen suurin osa mittauspisteistä on lähes koko ajan lievästi ylipaineisia, mutta tulokset ovat kuitenkin lähempänä nollaa.

Taulukko 9. Neljännen kerroksen mittauspisteiden tulokset maaliskuulta

	45641_TK01_PDIT16 _A411_M	45641_TK01_PDIT16 _A423_M	45641_TK01_PDIT16 _A407_M	45641_TK01_PDIT16 _A429_M	Kaikki pisteet
<b>Keskiarvo</b>	0,7	1,1	1,5	0,8	1,0
<b>Mediaani</b>	0,5	0,5	1,1	0,4	0,5
<b>Ylipaineinen</b>	75 %	95 %	100 %	93 %	90 %
<b>Alipaineinen</b>	25 %	5 %	0 %	7 %	9 %

Tarkasteltaessa maaliskuun ensimmäistä viikkoa (taulukko 10), yksi mittauspisteistä onkin hieman alipaineinen ja keskiarvot ja mediaanit ovat erittäin lähellä nollaa. Tarkasteluvälilläkin on siis väliä tulosten tulkintaan.

Taulukko 10. Neljännen kerroksen mittauspisteiden tulokset maaliskuun ensimmäiseltä viikolta

	45641_TK01_PDIT16 _A411_M	45641_TK01_PDIT16 _A423_M	45641_TK01_PDIT16 _A407_M	45641_TK01_PDIT16 _A429_M	Kaikki pisteet
<b>Keskiarvo</b>	-0,3	0,2	1,0	0,0	0,2
<b>Mediaani</b>	-0,2	0,4	0,8	0,4	0,4
<b>Ylipaineinen</b>	41 %	79 %	99 %	73 %	90 %
<b>Alipaineinen</b>	57 %	21 %	1 %	27 %	9 %

Koska suuri merkitys on nimenomaan sillä, kuinka paljon ja kuinka kauan tila on yli- tai alipaineinen, taulukossa 11 on eriteltynä neljännen kerroksen mittauspisteiden data 5 pascalin välein. Tästä on jo hyvin helppo huomata, että jokainen mittauspiste on ollut selvästi suurimman osan ajasta ylipaineinen ja

ylipaineisuus on ollut välillä 0-5 pascalia. Yli 10 pascalin ylipaineisuutta on ollut vain 1-2 % ajasta ja yli -5 pascalin alipaineisuutta ei lainkaan. Luokiteltaessa tuloksia tällä tavoin, suurimmat piikit eivät vaikuta tuloksiin vaan tästä nähdään helposti, millä alueella paine-erot ovat suurimman osan ajasta.

Taulukko 11. Neljännen kerroksen mittauspisteiden tulokset eriteltyinä

[Pa]	45641_TK01_PDIT16 _A411_M	45641_TK01_PDIT16 _A423_M	45641_TK01_PDIT16 _A407_M	45641_TK01_PDIT16 _A429_M	Kaikki pisteet
> -10	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
-10 - -5	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
-5 - 0	19 %	4 %	1 %	5 %	7 %
0 - 5	71 %	82 %	83 %	83 %	80 %
5 - 10	9 %	12 %	14 %	10 %	11 %
>10	1 %	2 %	2 %	2 %	2 %

## 6 Ohjeistus paine-erojen suunnitteluun, mittaamiseen ja seurantaan

Paine-eron mittaamisen suunnittelussa on tärkeää tutustua kohteeseen ja valita mitattavat tilat huolella. Mittauspisteiden sattumanvarainen sijoittelu ei anna riittävän luotettavaa tietoa rakennuksen painesuhteista, eikä tällaisten tulosten perusteella kannata tehdä muutoksia tilanteeseen. Yksi tärkeimmistä asioista mittauspisteiden suunnittelussa on ulkomittauspisteen sijainnin valinta. Paras ratkaisu on, että ulkomittauspisteitä on niin, että jokaisessa kerroksessa on oma ulkomittauspiste ja ainakin kahteen eri ilmansuuntaan. Ilmansuuntia valitessa olisi hyvä pyrkiä ottamaan huomioon rakennuksen sijainti ja muoto. Jos mahdollista ulkomittauspiste sijaitisi samalla ilmansuunnalla kuin sisämittauspiste, jolloin saadaan juuri tähän mittauspisteen tilaan ja sen ulkoseinään kohdistuva paine-ero mitattua. Toki tämä ei kuitenkaan ole aina mahdollista, ja tällöin tuuli voi vaikuttaa tuloksiin. Tuloksia analysoitaessa tämä asia olisi hyvä huomioida.

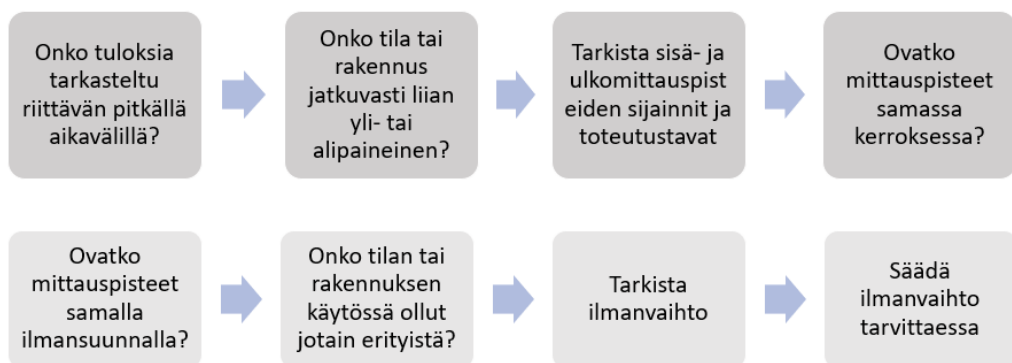
Jos kerroskohtaiset ulkomittauspisteet eivät onnistu, pitää hormivaikutus ottaa huomioon tuloksissa laskennallisesti. Jos hormivaikutusta ei huomioida, tulokset voivat varsinkin korkeissa rakennuksissa olla epäluotettavia ja antaa täysin väärää tietoa painesuhteista.

Uusissa rakennuksissa hyvään tiiveyteen tähtääminen parantaa myös paine-erojen hallintaa. Tähän kannattaa siis mahdollisuuksien mukaan pyrkiä.

Tärkeimmät asiat paine-erojen mittauksia suunnitellessa ovatkin nämä kolme:

1. Referenssimittauspiste kerroskohtaisesti
2. Mittauspisteet samalla korkeudella
3. Mittauspisteen sijainnilla tilassa ei ole suurta väliä, mutta ei mieluiten tulo- tai poistoilmalaitteiden tai ikkunan/oven läheisyyteen

Kuviossa 9 on esitetty mittaustulosten seurantaan liittyvä prosessi. Siinä on otettu huomioon asioita, jotka vaikuttavat tuloksiin ja jotka kannattaa tarkastaa ennen kuin suuria muutoksia järjestelmiin tehdään.



Kuvio 9. Mittaustulosten seuranta

Mittaustuloksia tulkitessa on tärkeää ensinnäkin katsella tuloksia riittävällä aikavälillä. Hetkellinen mittaustulos ei välttämättä kerro todellisesta tilanteesta mitään. Mittaustuloksia olisi hyvä tarkastella ainakin kuukauden ajalta. On myös hyvä huomioida vuodenajan merkitys. Talvella ulko- ja sisälämpötilan eron ollessa suurempi, myös paine-erot sisä- ja ulkotilojen välillä kasvavat ilman lämpötilan ja hormivaikutuksen vuoksi. Jos kesällä paine-erot rakennusvaipan yli ovat suuret, johtuu tämä ero todennäköisimmin ilmanvaihdosta.

Ensimmäisenä olisi tärkeää tarkastella, onko tila yli- vai alipaineinen. Jos tila on jatkuvasti jompaakumpaa, sitä kannattaa tutkia tarkemmin. Tämän jälkeen

mittaustuloksista pitäisi katsoa keskiarvoa tai tulosten mediaania, koska näissä tapauksissa suurimmat heilahdukset suodattuvat pois. Nämä piikit voivat johtua esimerkiksi tuulesta tai tilojen käyttöön liittyvistä asioista ja näillä ei pidemmällä aikavälillä ole merkitystä. Jos tila on jatkuvasti yli- tai alipaineinen ja keskiarvo ja/tai mediaani on yli +10 Pa tai alle -10 Pa, pitäisi tilaan ja sen mittauksiin tutustua tarkemmin.

Tämän jälkeen pitäisi tarkistaa mittauspisteiden sijainnit; sekä sisä- että ulkopisteiden sijainnit. Ovatko ne samassa kerroksessa ja samassa ilmansuunnassa? Voiko mittauspisteisiin liittyä mittausvirheitä? Ovatko mittauspisteet asennettu oikein ja toimivasti? Onko mittauspisteitä sellaisissa paikoissa, joissa niihin vaikuttaa erityisen suuresti hormivaikutus, kuten avoimet porraskäytävät, tai epätiiveyskohdat rakennusvaiheessa? Tällaiset seikat voivat vääristää tuloksia.

Jos nämäkin vaikuttavat olevan kunnossa, kannattaa vielä tarkastaa onko tilan tai rakennuksen käytön suhteen ollut jotain muutoksia tai erityistä mittausjakson aikana. Jos virheitä tai poikkeavuuksia ei ole, tämän jälkeen vasta kannattaa tarkastaa ilmanvaihto ja sen toimivuus. Ilmanvaihdon aikataulun muutokset tai erillispoistojen käytöt vaikuttavat paine-eroihin. Jos ilmanvaihdon toimivuudessa ei ole ongelmia, vasta tämän jälkeen voi harkita mahdollisia ilmanvaihdon säätötoimenpiteitä.

Tällaisen seurantajärjestelmän toteutus onnistuisi myös talotekniikan seurantajärjestelmiin. Tila- tai rakennuskohtaisesti olisi helppo esittää onko tila tai rakennus yli- vai alipaineinen laskemalla yksinkertaisesti mittaustuloksista yli- ja alipaineisuuden prosenttiosuudet. Tämän jälkeen taas tila- tai rakennuskohtaisesti olisi esitetty esimerkiksi värikoodeilla, kuinka lähellä tila tai rakennus on tasapainotilannetta eli nollaa laskettaessa esimerkiksi viikon tai kuukauden keskiarvoa. Jos tilan tai rakennuksen painesuhde on +5 Pa, väri olisi vihreä. Jos +0-5 Pa, värinä voisi olla oranssi. Jos tätä suurempia arvoja esiintyy, värinä olisi punainen. Näin käyttäjän olisi helppo nähdä nopeasti, minkälainen tilanne tilassa tai rakennuksessa vallitsee.

## 7 Pohdinta

Aihe työhön saatiin jo keväällä 2019, jolloin virallista opasta paine-erojen mittaamisen ei vielä ollut julkaistu. Tutkittavan kohteen valmistuminen kuitenkin myöhästyi niin paljon, että virallinen opas aiheeseen ehti ilmestyä. Oppaassa olleet asiat vastasivat osittain jo työn aiheeksi mietittyihin kysymyksiin. Aihe on kuitenkin sen verran laaja, että aihetta oli hyvä ja on edelleen hyvä tutkia.

Tutkimuskysymyksiin löytyi hyvin mittaustuloksista vastaukset. Vaikka mittaustuloksissa oli hieman epäluotettavuutta, silti ne todistivat hyvin teorian oikeaksi. Mittaustulosten suurin epäluotettavuus syntyi mittauksien eriaikaisuudesta. Referenssipistettä kerrosten välillä vaihdettiin välillä ja näitä tuloksia vertailtiin keskenään. Täysin samanaikaisia mittaustuloksia ei siis saatu, joten tulokset eivät kaikilta osin ole täysin vertailtavissa, koska sääolosuhteet ovat eronneet mittausten aikana. Ulkolämpötilavaihtelut olivat vähäisiä kaikkina vertailtuina ajankohtina ja koska koulu oli kiinni ja ilmanvaihto pyöri koko ajan samalla tavalla, mittausten vertailua voidaan pitää suhteellisen luotettavana.

Työn suurin opetus oli se, että yksiselitteisiä ja täysin luotettavia mittaustuloksia on vaikea saada. Koska puhutaan hyvin pienistä paine-eroista, pitää tuloksiin suhtautua hyvin kriittisesti ja tutustua mittaajajärjestelmään kunnolla ennen kuin tekee liian pitkälle johtavia loppupäätelmiä. Asia on tärkeä ja sillä on suuri merkitys rakennusten terveyteen ja pitkäikäisyyteen. Paine-eroihin sisä- ja ulkotilojen välillä vaikuttaa kuitenkin todella moni asia ja siksi niiden hallinta on yllättävän hankalaa. Varsinkin vanhoissa kohteissa, jotka eivät ole tiiviitä on hankalaa hallita ilmavirtoja ja tällöin myös tuulella ja hormivaikutuksella on suurempi merkitys.

Toinen suuri haaste syntyy myös siitä, mihin paine-eroon halutaan päästä. Ideaalitalanne olisi tietenkin pyrkiä tasapainotilanteeseen, mutta käytännössä tämä on mahdotonta. Tästä syystä varsinkin aiemmin on pyritty enemmän alipaineiseen kuin ylipaineiseen tilanteeseen. Rakennuksia pitäisi kuitenkin tarkastella yksilöinä eli jossakin kohteessa pieni ylipaine saattaa olla

terveellisempi vaihtoehto kuin alipaineisuus. Yksiselitteistä vastausta oikeaan paine-eroon ei siis ole.

Jos paine-erosuhteet haluttaisiin pitää hyvin hallinnassa, olisi uudiskohteissa tärkeää yrittää eliminoida mahdollisimman moni painesuhteisiin vaikuttava tekijä. Tämä tarkoittaa käytännössä mahdollisimman tiivistä rakennusta mahdollisimman vähillä ilmanvuotokohdilla. Tällöin päästään tilanteeseen, jossa ilmanvaihdolla on suurin merkitys paine-eroihin ja tuulen ja hormivaikutuksen merkitys pystytään minimoimaan. Ilmanvaihto pitää osata säätää tasapainoon ja myös pitää se tasapainossa. On myös huomioitava, että ilmanvaihto on tasapainossa sekä talvella että kesällä kun lämpötilaerot ovat erilaiset. Ilmanvaihtoon myös tehdään helposti muutoksia esimerkiksi käyntiajoissa tai tilamuutosten yhteydessä litramäärissä miettimättä sen kummemmin mikä vaikutusta näillä toimenpiteillä on koko rakennuksen tasapainoon. Esimerkiksi erillispoistojen käyttö käyttöajan ulkopuolella voi vääristää painesuhteet rakennuksessa täysin. Samoin muuttuvilmavirtaisissa järjestelmissä painesuhteet voivat vaihdella huomattavastikin riippuen tilojen käytöstä. Ilmanvaihdon säädettävyydenkin on monissa kohteissa rajallista, jolloin rakennuksen painesuhteiden hallintaan saaminen on vaikeaa.

Vanhoissa kohteissa painesuhteiden säätäminen on vielä haastavampaa, koska se saattaisi vaatia suuria muutoksia ilmanvaihtojärjestelmään. Koneellinen poistojärjestelmä vaatii paine-eroja toimiakseen, mutta haasteena on hormivaikutuksen huomioiminen. Talvella pakkasella sisällä lämmin ilma nousee ylöspäin ja aiheuttaa ylipainetta ylikerrokseen ja alipainetta alakerrokseen. Pelkkä poistoilmapuhallin ei tätä tilannetta pysty hallitsemaan eikä sillä saada paine-erosuhteita hallintaan.

Aihe kokonaisuudessaan on mielenkiintoinen ja on hyvä, että siihen on alettu kiinnittämään huomiota. Mittaamiseen ja mittaustulosten tulkintaan liittyy paljon haasteita ja yksiselitteisiä vastauksia on vaikea saada. Mittauksilla pystytään kuitenkin todentamaan, jos rakennus tai tila on kovasti yli- tai alipaineinen ja tähän tilanteeseen on tällöin mahdollista reagoida ennen kuin ongelmia rakenteissa tai sisäilmassa alkaa ilmetä. Mittauksien käyttö on siis hyvin



suositeltavaa ja niiden kytkeminen automaatiojärjestelmään tai talotekniikan seurantajärjestelmään on erittäin tärkeää, koska näiden ohjelmien kautta dataa on mahdollista suodattaa ja muuttaa sellaiseen muotoon, josta käyttäjän on helpompi sitä tulkita.

## Lähteet

- Björkroth, M., Eskola, L. 2019. Rakennusten paine-erojen mittausohjeprojektin loppuraportti. A-insinöörit.  
[https://www.talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/rakennusten\\_paine-erojen\\_mittausohje\\_2019-10-11.pdf](https://www.talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/rakennusten_paine-erojen_mittausohje_2019-10-11.pdf). Luettu 15.5.2020
- Hagentoft, C.-E. 2001. Introduction to Building Physics. Lund: Studentlitteratur.
- Järnström, H., Saari, M., Koivusaari, R. 2017. Sisäilman laadun hallinta rakennushankkeen eri vaiheissa. Espoo: VTT Expert Services Oy.
- Kattoliitto ry. 2013. Toimivat katot 2013. Sastamala: Kattoliitto ry.
- Kuntien sisäilmaverkosto. 2019. Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohje ja julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohjeen perustelumuistio.
- Laine, K. 2015. Rakenteiden ilmatiivyyden parantaminen osana onnistunutta sisäilmakorjausta. Teoksessa Rakentajain kalenteri 2015. 99. vuosikerta. Rakennustieto Oy.
- Ojanen, T. 2015. Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden perusteet. Teoksessa Rakentajain kalenteri 2015. 99. vuosikerta. Rakennustieto Oy.
- Pitkäranta, M. 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- Ricketts, L., Finch, G., Straube, J. 2015. Pressure Differences and Airtightness in Tall Buildings – Theory & Reality. Conference paper.
- RT 07-11299. Sisäilmastoluokitus 2018. 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Helsinki: Rakennustieto.
- Saari, M., Nyman, M., Koivusaari, R., Järnström, H. Ilmanvaihtojärjestelmän merkitys sisäilman laadulle. VTT Expert Services Oy.
- Seppänen, K. 2010. Painesuhteet rakennuksen ulkovaipan yli. Aducate Reports and Books 9/2010. Kuopio: Koulutus- ja kehittämisspalvelu Aducate Itä-Suomen yliopisto.
- Seppänen, O., Seppänen, M. 1996. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Helsinki: Sisäilmayhdistys ry. Toinen korjattu painos.
- Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015.
- Stanke, D., Bradley, B. 2002. Managing the ins and outs of Commercial Building Pressurization. Trane.
- Valvira. 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje osa I. Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto.
- Vinha, J., Laukkarinen, A., Kaasalainen, T., Pihlajamaa, P., Teriö, O., Jokisalo, J., Annala, P., Harsia, P., Hedman, M., Heljo, J., Kallioharju, K., Kauppinen, A., Kero, P., Kivioja, H., Lehtinen, T., Marttila, T., Moisio, M., Mäkinen, A., Paatero, J., Raunima, T., Ruusala, A., Sankelo, P., Sekki, P., Sirén, K., Tuominen, E., Tuominen, O., Uotila, U., Uusitalo, S. 2019. Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017.